第30卷　第9期　　材　料　研　究　学　报　　Vol. 30 No. 9
2016年9月　　CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH　　September 2016

开孔泡沫铝-环氧树脂复合夹芯板局压性能试验研究*

辛亚军　肖　博　程树良　李慧剑

(燕山大学 河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 对一种开孔泡沫铝-环氧树脂复合夹芯板进行了准静态局部压缩试验, 研究了其破坏形态和典型荷载-位移曲线, 并与传统蒙皮夹芯板进行了对比, 分析了不同复合层厚度、不同压头类型和不同边界条件对局压刚度、极限承载力及吸能量等主要性能参数的影响。结果表明开孔泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板在局部压力作用下表现了较好的整体性、稳定性和吸能性能, 其典型荷载-位移曲线经历四个阶段: 弹性阶段、局部损伤阶段、整体损伤阶段和冲切破坏阶段。泡沫铝-环氧树脂复合层能显著提高夹芯板力学性能, 且随厚度增加有增强趋势, 球柱形压头作用下的破坏形态和力学性能与圆柱形压头和方形压头有明显区别, 简支边界条件下力学性能比固支时明显降低。与传统夹芯板相比, 这种夹芯板的刚度、强度、吸能量和整体性都有较大提高。

关键词 复合材料, 夹芯板, 泡沫铝-环氧树脂, 复合夹芯板, 局压

分类号 TG115　　文章编号　1005-3093(2016)09-0703-08

Performance by Localized Indentation Test of Composite Sandwich of Open-cell Aluminum Foam and Epoxy Resin

XIN Yajun　XIAO Bo　CHENG Shuliang**　LI Huijian

(Key Laboratory of Mechanical Reliability for Heavy Equipments and Large Structures of Hebei Provice, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

*Supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, No. E2013203183 and the Science and Technology Fund of Minstry of Housing and Urban-Rural Development, No. 2013-K2-2.

Manuscript received April 5, 2016; in revised form June 16, 2016.

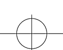
**To whom correspondence should be addressed, Tel: 13603354653, E-mail: slcheng@ysu.edu.cn

ABSTRACT By carrying out quasi-static localized indentation tests, failure modes and typical load-displacement curves of composite sandwich of open-cell aluminum foam and epoxy resin were studied. It was also compared with the traditional sandwich panel. The influence of composite layer thickness, indenter type and boundary condition on the localized indentation stiffness, ultimate bearing capacity and energy absorption capacity were analyzed. The results indicate that this kind of composite sandwich panel has good integrality, stability and energy absorption capacity in the condition of indentation. Load-displacement curves have gone through four phases: elastic phase, local damage phase, overall damage phase and punching failure phase. Mechanical properties of sandwich panel have been obviously improved by the over lapped layers of aluminum foam and epoxy resin. Also, there exists an increasing tendency of the mechanical property of the panel with the increase of composite layer thickness. Failure modes and mechanical properties of specimens with spherical indenter are very different from cylindrical indenter and square indenter. Mechanical properties of specimens, which were simply supported are poorer than specimens, which were fully fixed. The stiffness, strength, energy absorption capacity and integrality of composite sandwich panel are superior to those of the traditional sandwich panel.

KEY WORDS composite, sandwich panel, aluminum foam and epoxy resin, composite sandwich panel, indentation

泡沫铝是一种具有高孔隙率和较大孔径类似泡沫状的新型结构功能材料。由于其独特的多孔结构, 使其在压缩状态下表现出一个较长的塑性应变过程, 在承受荷载塌陷至一个更加稳定的状态前能

* 河北省自然科学基金E2013203183和住建部科科技计划2013-K2-2资助项目。
2016年4月5日收到初稿; 2016年6月16日收到修改稿。
本文联系人: 程树良
DOI: 10.11901/1005.3093.2016.178



吸收很大的能量并保护其他结构免受损坏[1-3], 故使其在减震吸能方面得到了越来越多的应用, 如建筑、航空航天、船舶、汽车制造、军事、包装等领域[4-6]。泡沫铝夹芯板是由上下两层较薄面板与中间较厚的泡沫铝芯层构成, 这种夹芯板不但质量轻、吸能效率高, 而且具有较高比刚度和比强度, 具有广泛的应用前景[7-9]。

对泡沫铝材料的动态力学性能的研究在国外已经开展多年, 早在1983年, Reid等[10]对冲击载荷作用下一维金属环惯性效应进行了实验研究。近年来, 学者在对泡沫铝材料及其夹芯板在动态冲击荷载和准静态荷载下的力学性能进行了深入研究。Moon等[11]通过试验和模拟分析研究了泡沫铝芯三明治型复合材料的冲击性能, 分别观察了试件在承受不同能量冲击下的破坏模式, 并将试验结果与模拟进行了对比, 表明了数值结果可以有效模拟该种结构的冲击力学性能。Li等[12]对于泡沫材料在冲击载荷作用下的动态响应进行了研究, 得出应力波通过泡沫材料时动量与应力波幅值之间的关联性。敬霖等[13]应用泡沫金属子弹撞击加载的方式研究了固支边界下泡沫金属夹芯板的塑性动力响应, 讨论了泡沫金属夹芯板在冲击荷载作用下的破坏模式和抗撞击能力等。庞宝君等[14]建立了针对泡沫铝动态冲击响应的Taylor分析模型, 并验证了模型在泡沫铝子弹撞击试验中的有效性。王青春等[15]对不同密度、高度和压缩方向下泡沫铝进行了准静态压缩试验与冲击试验, 研究了其在准静态压缩和冲击状态下的吸能特性。尚金堂等[16]对泡沫铝层合梁在三点弯曲作用下的载荷-位移曲线、变形过程及面板破坏等进行了研究, 通过实验与数值计算建立了泡沫铝层合梁的破坏模式图。刘新让等[17]利用LS-DYNA分析了泡沫铝夹芯圆筒和钢制实心圆筒在不同爆炸作用下的动力响应, 说明了泡沫铝夹芯板的抗爆吸能优势。Greyes等[18]对不同纤维铺层的泡沫铝夹芯结构吸能性进行了研究, 研究表明混合铺层形式较单一面板吸能性有较大幅度的提高。Mohan、Olurin、Dong等[19-21]研究了不同压头形式、不同表层材料时的泡沫铝夹芯板在准静态局压下的力学性能, 发现夹芯板有芯体凹陷、芯体破碎和面层弯曲等几种破坏形式, 且塑性变形主要位于压头下方的区域; 李志斌等[22]利用MTS和落锤试验机研究了由复合材料面板和泡沫铝芯层组成的夹芯板结构在压入和侵彻时的变形和失效行为, 并引入了衡量夹芯板吸能性能的能量吸收效率因子。这些研究成果对泡沫铝夹芯板力学性能的提高和应用有积极促进作用。

传统的泡沫铝夹芯板的制备方法主要有胶接法和焊接法[23-24]。胶接法的粘接强度较低, 在高温或腐蚀条件下性能较差, 容易发生芯层与面层剥离; 焊接法使焊剂与铝的结合容易产生腐蚀问题, 另外焊接连接的区域仅限孔棱处, 也会导致结构强度降低。文献[25]提出了一种开孔泡沫铝-环氧树脂复合夹芯板, 并对其进行了压缩和弯曲试验研究, 初步表明这是一种制作工艺简单、吸能性强的泡沫铝夹芯板结构。这种夹芯板上下两面为泡沫铝/环氧树脂复合层, 中间为泡沫铝芯层, 其芯层和面层连成整体, 无明显的分界面, 改变了传统夹芯板受力时发生面层剥离的问题, 整体性能获得了极大的提高。

1 实验方法

1.1 实验材料

泡沫铝芯材采用北京金艾伯特泡沫金属有限公司生产的丝网状开孔泡沫铝, 密度为0.8 g/cm^3, 平均主孔径2.5 mm, 孔隙率85%, 通孔率95%以上。环氧树脂和固化剂分别采用廊坊诺尔信化工有限公司生产的双酚-A型E44和聚酰胺活性固化剂651#型, 增塑剂采用邻苯二甲二丁酯, 消泡剂采用二甲基硅油。

1.2 试件的制备

将20 mm厚泡沫铝板切割成150 mm×150 mm的标准试件尺寸, 然后用工业乙醇冲洗, 去除表面油脂, 放于通风处自然晾干; 制作槽型模具用以泡沫铝浸入树脂, 模具高度为树脂浸入厚度; 将环氧树脂和固化剂放入水浴锅中, 水温保持60℃, 当二者具有良好的流动性后停止加热, 在烧杯中按1:1配比进行融合, 加入5%的增塑剂并迅速搅拌, 直至聚合物的颜色均匀且无气泡时为止; 将搅拌好的树脂倒入已做好的具有特定厚度的模具中, 注满、刮平, 然后将处理后待用的泡沫铝芯材缓慢平稳地放入模具中, 使树脂从泡沫铝板的底部充分浸入; 在室温条件下固化3 d, 然后拆除模具, 把泡沫铝板边缘的多余树脂去除, 翻板后按同样的步骤将另外一面浇筑好树脂; 传统夹芯板用树脂做粘结剂将铝板和泡沫铝芯体粘接在一起。

图1为泡沫铝/环氧树脂一体型夹芯板的结构示意图。图2为制作完成的试件。试验设计制作了不同复合层厚度、压头类型和边界条件的7组(共17个)试件, 为了试验数据的准确性, 设计了3个试件为一组, 试件参数以及编号见表1。

1.3 试验装置及加载

选用WDW3100型微控电子万能试验机对试件

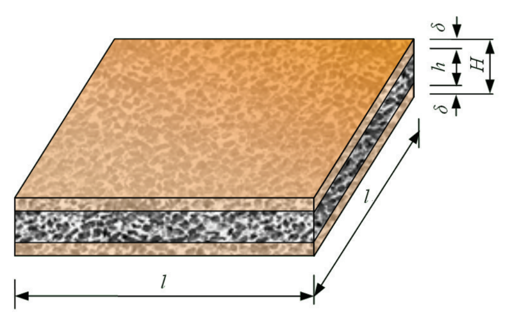


图1 试件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the specimen. *H*- the specimen's height; *δ*- the immersed resin thickness; *h*- the core's thickness; *l*- the length of specimen edges

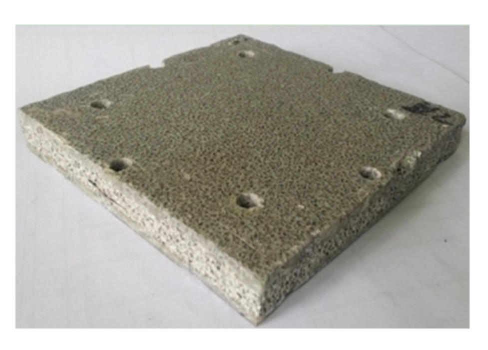


图2 试件样本

Fig.2 Test specimen sample

表1 试件的编号和参数

Table 1 Specimens number and parameter

Group.	Composite layer thickness δ/mm	Boundary conditions	Indenter shapes
G1-1/2/3	0	Fully fixed	Cylindrical
G2-1/2/3	2.5	Fully fixed	Cylindrical
G3-1/2/3	4	Fully fixed	Cylindrical
G4-1/2/3	2.5	Fully fixed	Square
G5-1/2/3	2.5	Fully fixed	Spherical
G6-1/2	2.5	Simply supported	Cylindrical
G7-1	0.5 mm aluminum	Fully fixed	Cylindrical

进行加载。所有试件均在压头速度为1 mm/min下进行试验。压缩试验依据GB/T1453-2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》, 由计算机自动采集所有实验数据。

试验中采用两类压头: 平端面压头和渐进端面压头。平端压头包括圆柱形、方柱形两种, 圆柱形压头直径40 mm(面积约1257 mm^2), 方柱形压头边长35.5 mm(面积为1260 mm^2), 压头底部的棱线均有5°的倒角。渐进端面压头采用球柱形压头, 球柱压头直径40 mm。加载支架边长150 mm, 由平板居中切割圆洞制成, 圆洞直径120 mm, 支架边缘均匀设置8个螺孔。边长150 mm的方形试件直接放于支架, 即为简支边界。同样制作一个与支架相同形状的压板, 压板边缘均匀设置8个螺孔, 将试件置于支架和盖板之间, 螺孔内穿螺栓固定, 则构成固定边界。

2 实验结果

2.1 破坏过程和破坏形态

图3为泡沫铝-环氧树脂复合夹芯板局压时不同状态与压头类型下的不同受力阶段破坏过程和破坏形态。

(1) 平端面压头(圆柱形和方柱形)

试验初始阶段, 在位移较小的情况下荷载急速增长, 荷载-位移呈线性关系, 其骨架发生弹性形变, 试件上表面轻微凹陷(图3a1, b1); 随着荷载继续增长, 首先在试件下复合层表面出现微裂缝, 试件上表面围绕压头出现明显凹陷(图3a2, b2); 随着位移增大, 下部裂缝持续扩展至芯材层, 随后在试件上复合层表面出现环状裂缝, 环状裂缝的直径大约为压头直径2倍(图3a3, b3); 最后沿压头棱线附近的材料因为剪切原因而出现了试件的冲切破坏(图3a4, b4)。破坏后试件底部表现为沿压头范围内的冲切破坏和压头约2倍直径范围内的弯曲破坏形态(图3a5, b5), 属于局部冲切和弯曲失效模式。

(2) 渐变端面压头(球柱形)

由于球柱形压头端面的渐变性, 压头是逐步接触试件上表面, 试件的破坏是从压头正下方一点开始, 逐步刺入试件(图3c1, c2), 试件上表面没有明显大范围凹陷, 只在压头近距离内有明显变形(图3c3), 最后因为压头的刺入出现刺穿破坏(图3c4), 破坏后试件底部表现为沿压头中心的花瓣形开裂的刺入破坏形态, 开裂范围约在1.5倍压头直径内, 且四周没有明显凸起变形(图3c5)。球柱形压头作用下压头周围变形很小, 局压破坏局限于压头范围内, 主要为局部冲切失效模式。

(3) 简支边界条件

简支边界情况下试件的破坏过程与固支情况基本一致, 不同之处随着压头周围材料向下凹陷, 试件四周向上翘起, 底部裂缝的出现后试件整体呈碗型下凹, 最后也是因为压头棱线附近材料的剪切出现压头冲切破坏(图3d1-d4)。破坏后试件底部四条裂缝基本垂直四边, 表现为自中心向四周的放射性分布, 凹陷破坏的范围更大(图3d5), 试件最后呈整体

凹陷, 主要为整体弯曲失效模式。

2.2 典型荷载-位移曲线

局部压缩试验中, 当试件自由边缘到压头的距离不小于压头直径时, 边缘效应对荷载-位移曲线的影响可忽略不计[18], 本文试验系统满足该要求。

图4为固支边界条件下各组夹芯板的荷载-位移曲线以及从试验曲线规律得到的典型荷载-位移曲线。从试验曲线可知, 泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板具有较好的塑性和吸能性能。典型荷载-位移曲线大致分为四个阶段, 分别对应四个阶段夹芯板内部破坏状态如图5所示。

(1) 弹性阶段(O-A): 夹芯板在压头作用下整体产生微小凹陷变形, 构件上复合层和下复合层都没有裂缝产生, 夹芯板骨架整体处于弹性变形阶段, 由夹芯板此阶段的剖切图可见内部也没有发生明显变形(图5a)。

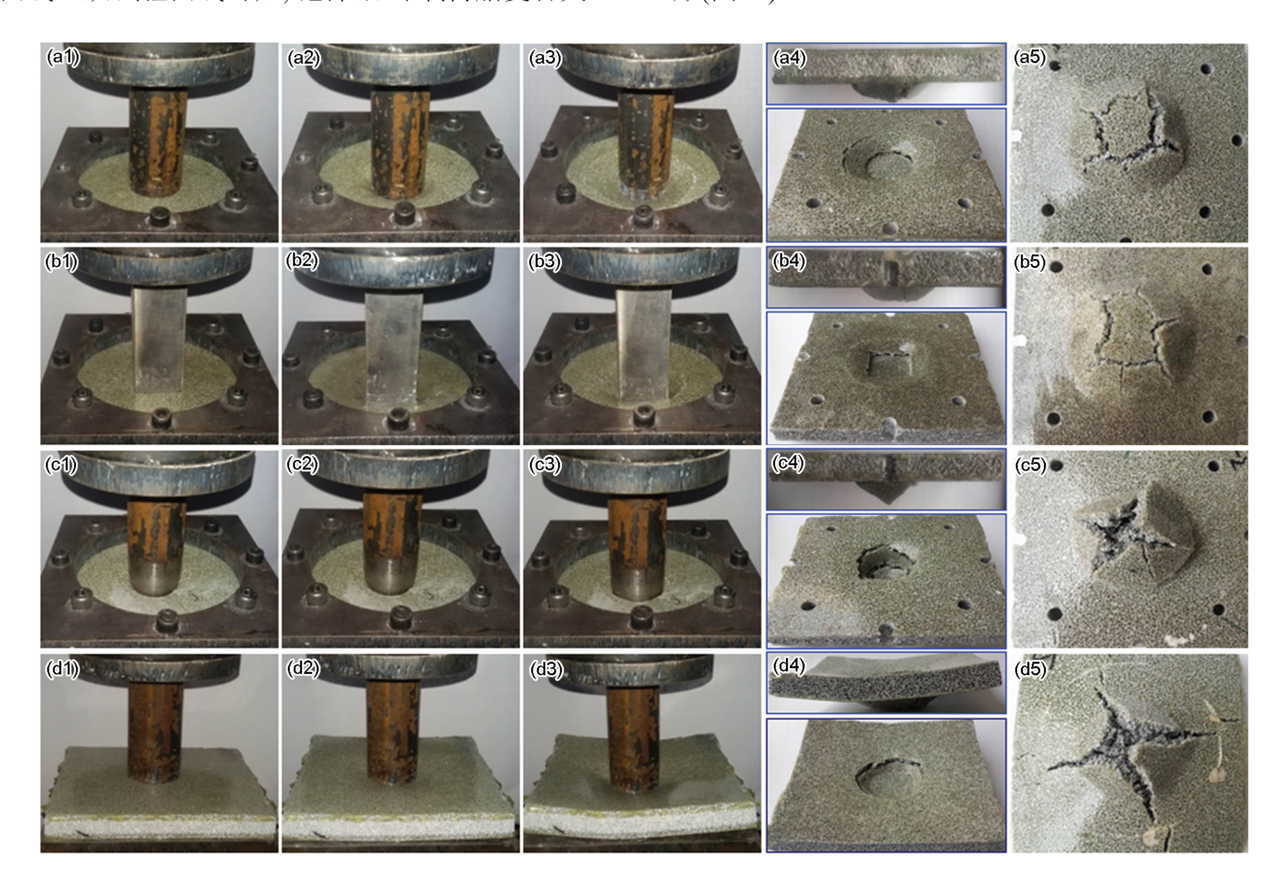


图3 试件破坏过程和破坏形态

Fig.3 Different destruction stages and forms of specimens (a1)-(a5) cylindrical indenter, fully fixed; (b1)-(b5) square indenter, fully fixed; (c1)-(c5) spherical indenter, fully fixed; (d1)-(d5) cylindrical indenter, simply supported

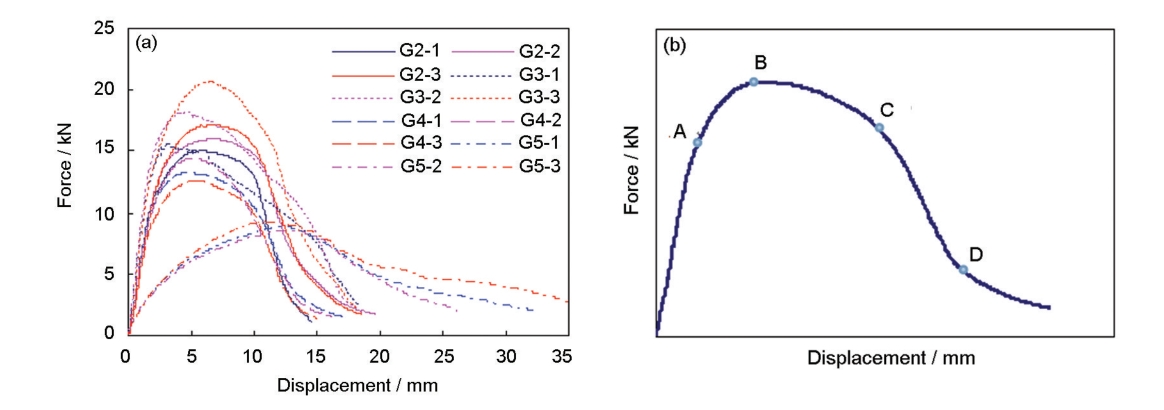


图4 荷载-位移曲线

Fig.4 Force-displacement curves (a) experiment force-displacement curves for spenciments of G2, G3, G4, G5 groups; (b) typical fprce-displacement curves

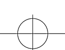




图5 局压各阶段试件横截面图

Fig.5 Cross sections of different destruction stages

(2) 局部损伤阶段(A-B): 在局压作用下夹芯板下复合层由于受拉作用首先产生微裂缝, 构件开始发生局部损伤, 荷载-位移曲线发生弯曲。由夹芯板此阶段的剖切图可见夹芯板自下复合层开始出现微裂缝并逐步向芯层发展(图5b)。由于压头凹陷其周围上复合层产生较大应力, 荷载-位移曲线达到极限荷载B点。

(3) 整体损伤阶段(B-C): 随着位移增加, 下部裂缝开展加深, 压头周围的上复合层由于拉应力逐渐产生裂缝, 承载力开始下降, 沿压头棱线处上复合层剪切作用增大。随着上复合层裂缝加深, 荷载持续下降至C点。由夹芯板此阶段的剖切图可见夹芯板上复合层裂缝逐渐开展加深, 同时沿压头棱线处的剪切变形增大, 压头处产生明显凹陷(图5c)。

(4) 冲切破坏阶段(C-D): 随着压头位移增大, 上复合层在压头棱线处由于剪切作用产生冲切破坏, 表现为压头急剧压入试件, 下复合层则表现为冲切和压头周围的弯曲破坏, 荷载急速下降直至压头刺入构件(图5d)。

3 讨论

3.1 复合层厚度的影响

本文进行了树脂复合层厚度分别为0、2.5 mm、4 mm三组试件(第1/2/3组)的试验对比, 三组试件破坏形态如图6所示。由图可知, 由于泡沫铝材料抗拉性能很差, 纯泡沫铝芯板的破坏是由于沿固定边缘的上表面环状开裂引起, 属于整体弯曲破坏; 复合层为2.5 mm的夹芯板上表面环状开裂很小, 仅出现一些微裂缝, 主要是压头陷入破坏, 属于局部冲切破坏; 复合层为4 mm的夹芯板是上复合层首先出现环状开裂, 然后压头陷入破坏, 属于局部冲切和弯曲破坏。由上述分析可知, 复合层厚度对夹芯板抗弯和抗剪能力影响很大, 复合层厚度不宜太小。

三组试件的局压荷载-位移曲线如图7所示。分别提取各试件的弹性刚度、极限强度, 并以荷载-位移曲线与位移轴之间所包含的面积[20]来表示每个试件的局压吸能量, 图8为各组试件局压刚度、极限承载力和吸能量比较图。



图6 不同复合层厚度破坏形态对比图

Fig.6 Destruction forms for different composite layer thickness. G1 composite layer thickness 0 mm; G2 composite layer thickness 2.5 mm; G3 composite layer thickness 4 mm

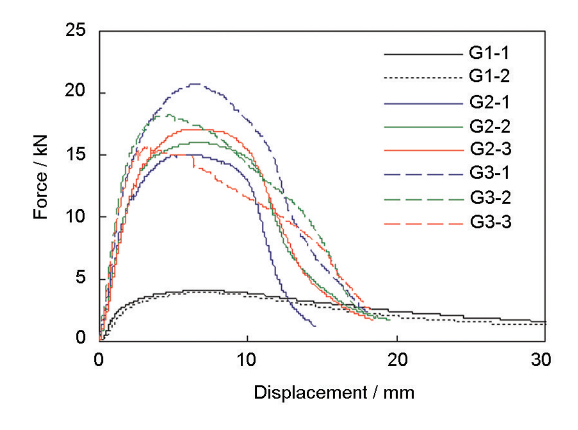


图7 第1/2/3组荷载-位移曲线比较

Fig.7 Force-displacement curves for group 1/2/3 G1 composite layer thickness 0 mm; G2 composite layer thickness 2.5 mm; G3 composite layer thickness 4 mm

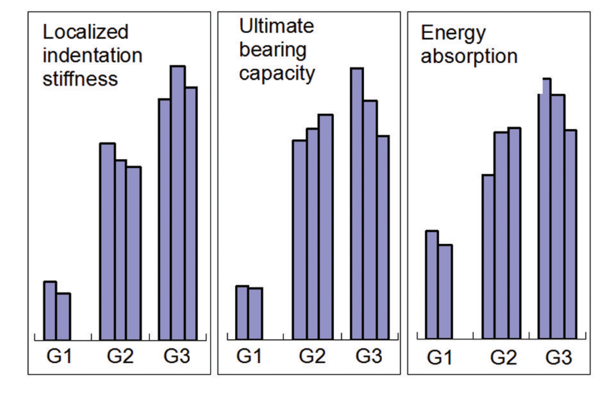


图8 第1/2/3组局压刚度、极限承载力和吸能量比较

Fig.8 Localized indentation stiffness, ultimate bearing capacity and energy absorption for group 1/2/3 G1 composite layer thickness 0 mm; G2 composite layer thickness 2.5 mm; G3 composite layer thickness 4 mm

由图分析可知, 泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板的强度和吸能能力比泡沫铝芯板有显著提高, 且随着复合层厚度增加, 夹心板的局压刚度和极限承载力以及吸能量有增加趋势。第2组局压刚度和极限承载力以及吸能量分别是第1组的3.54倍、3.98倍和1.90倍, 第3组是第2组的1.39倍、1.13倍和1.23倍。但是第3组试件的荷载-位移曲线的整体损伤阶段(B-C)比第2组短, 且有个别试件在极限荷载B点后出现了脆性断裂现象, 说明夹芯板的变形能力和塑性随复合层厚度增加而降低, 复合层不宜太大。

综上所述, 复合层厚度对复合夹芯板的力学性能影响显著, 复合层不宜太薄也不宜太厚, 由本文试验分析可知厚度在2.5~4 mm之间比较适宜。

3.2 压头类型的影响

本文进行了圆柱形、方柱形和球柱形三种压头的试验对比, 其他条件相同情况下三组试件分别为第2、第4和第5组, 破坏形态主要区别见图5。三组试件的局压荷载-位移曲线如图9所示, 各组试件局压刚度、极限强度和吸能量比较如图10所示。

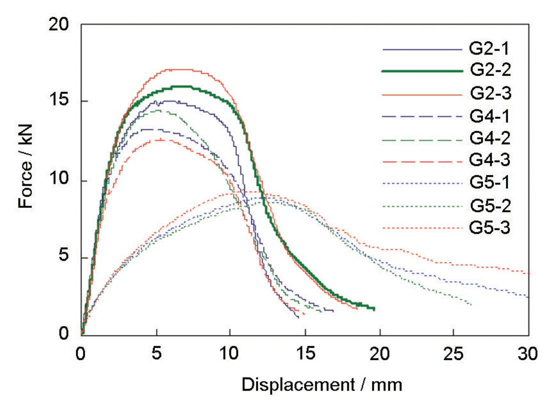


图9 第2/4/5组荷载-位移曲线比较

Fig.9 Force-displacement curves for group 2/4/5 G2 cylindrical indenter; G4 square indenter; G5 spherical indenter.

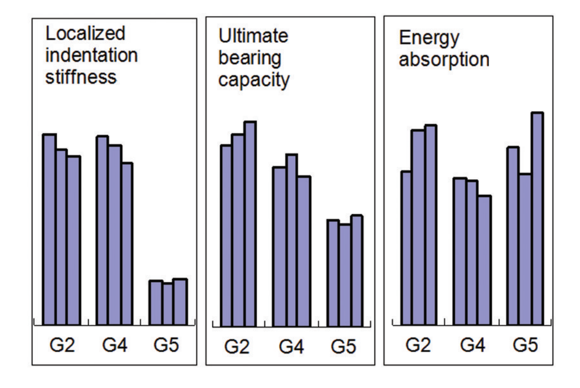


图10 第2/4/5组局压刚度、极限承载力和吸能量比较

Fig.10 Localized indentation stiffness, ultimate bearing capacity and energy absorption for group 2/4/5 G2 cylindrical indenter; G4 square indenter; G5 spherical indenter

由图分析可知, 圆柱形压头和方柱形压头作用下荷载-位移曲线形状一致。与圆柱形压头作用下相比, 方柱形压头作用下夹芯板局压刚度和吸能量为圆柱形压头作用下的84%和77%, 局压刚度相差很小。局压刚度体现的是夹芯板初始刚度, 因此两种压头作用下基本一致。夹芯板在变形过程首先产生沿中心的对称凹陷, 方形压头作用下四个角部会产生应力集中, 剪切破坏首先从四角开始, 因此其强度和变形能力稍弱, 吸能能力也稍差。球形压头作用时压头与夹芯板从点接触开始, 初始刚度体现的是上复合层局部的性能, 破坏是从压头底部刺穿逐渐发展, 因此弹性段很小, 局压刚度和极限承载力很低, 约为圆柱形压头作用下的25%和56%, 但是其变形能力较大, 吸能量与圆柱形压头作用相差不多。

3.3 边界条件的影响

本文采用了固支边界与简支边界两种边界约束情况, 其他条件相同情况下设计了第2组和第6组进行对比测试。两组试件的局压荷载-位移曲线如图11所示, 两组试件局压刚度、极限承载力和吸能量比较如图12所示。

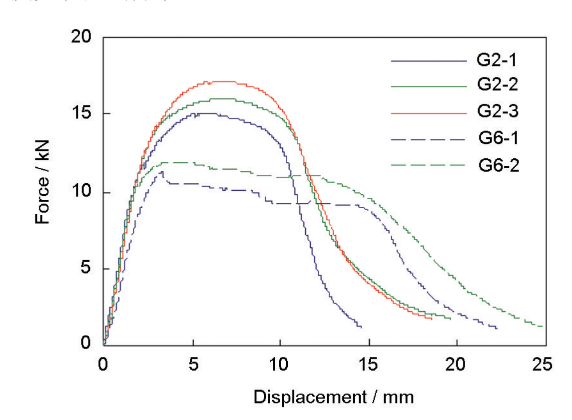


图11 第2/6组荷载-位移曲线比较

Fig.11 Force-displacement curves for group 2/6 G2 fully fixed; G6 simply supported.

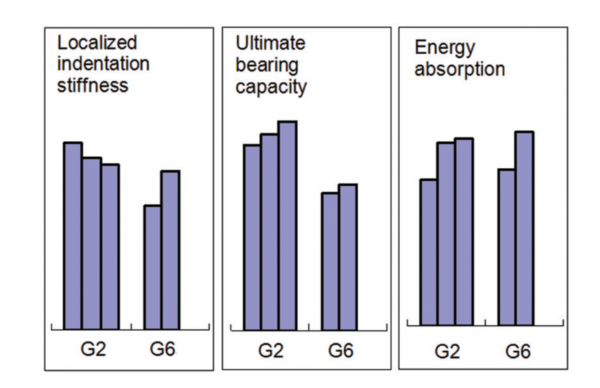


图12 第2/6组局压刚度、极限承载力和吸能量比较

Fig.12 Localized indentation stiffness, ultimate bearing capacity and energy absorption for group 2/6 G2 fully fixed; G6 simply supported

简支条件下复合夹芯板四角向上翘起, 底部因弯曲作用试件呈碗型下凹, 其破坏形态见图5。简支条件下试件四边没有固定, 开始阶段主要是整体弯曲受力, 极限承载力比固支边界小; 底部开裂进入塑性阶段, 裂缝开展过程荷载-位移曲线呈现较长的“平台段”, 变形能力较大, 因此吸能能力与固支条件下相差不多。简支条件下局压刚度和极限承载力分别为固支条件下的82%和72%, 说明夹芯板边缘约束情况对其力学性能影响很大, 增强边缘约束可提高其局压力学性能。

3.4 与传统夹芯板的比较

以环氧树脂为粘结剂, 选用0.5 mm厚的铝板制作了传统的铝板蒙皮夹芯板试件, 与泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板做对比测试, 其他条件相同情况下设计了第2组和第7组进行对比测试。

传统夹芯板在压缩过程中, 从弹性阶段开始试件表面以压头为中心出现铝板的起褶现象, 随着压力的增大褶皱逐渐增多增大, 直至上表面铝板与泡沫铝芯体剥离, 下表面的蒙皮层以压头为中心逐渐向边缘剥离, 最后以压头底部的蒙皮层断裂出现承载力下降而结束。传统夹芯板破坏过程和破坏形态如图13所示, 复合夹芯板与传统夹芯板的局压荷载-位移曲线如图14所示, 局压刚度、极限承载力和吸能量比较如图15所示。

由图分析可知, 泡沫铝-环氧树脂复合夹芯板比传统夹芯板的刚度、承载力和吸能量都有较大提高, 局压刚度提高52%, 极限承载力提高了116%, 吸能量提高了155%。充分说明了泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板具有良好的力学性能和吸能能力。

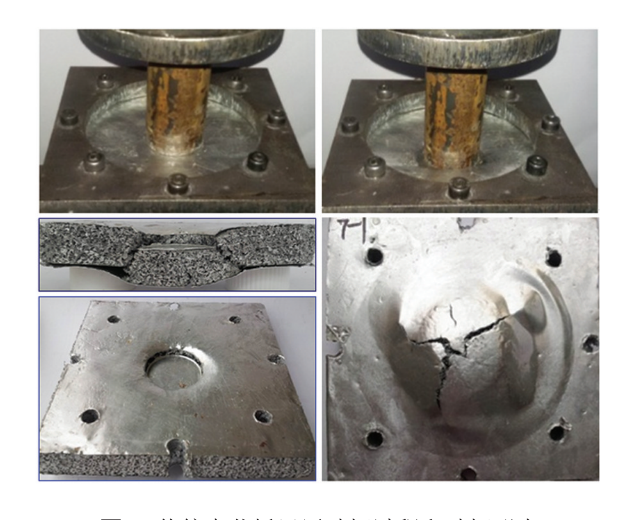


图13 传统夹芯板局压破坏过程和破坏形态

Fig.13 Destruction stages and forms of traditional sandwich panel G2 composite layer thickness 2.5 mm; G7 0.5 mm aluminum

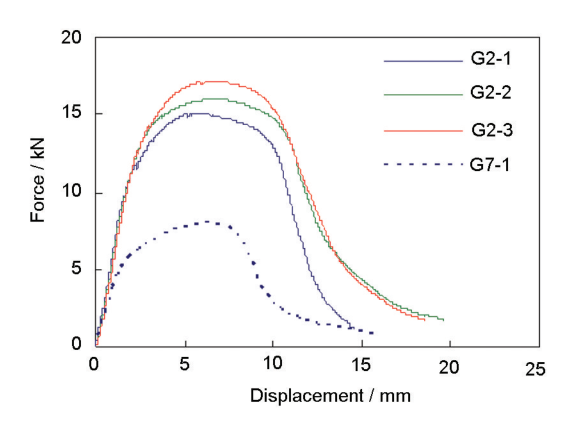


图14 第2/7组荷载-位移曲线比较

Fig.14 Force-displacement curves for group 2/7 G2 composite layer thickness 2.5 mm; G7 0.5 mm aluminum

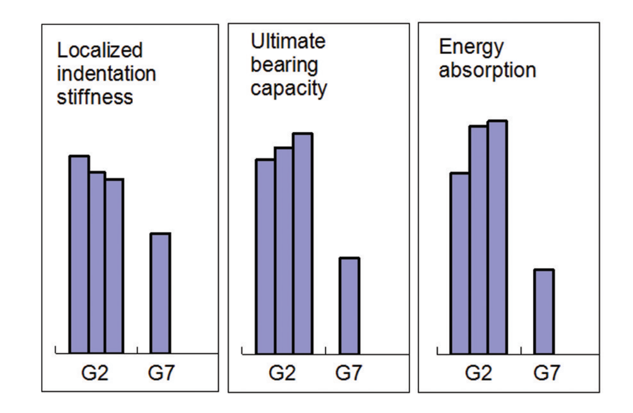


图15 第2/7组局压刚度、极限承载力和吸能量比较

Fig.15 Localized indentation stiffness, ultimate bearing capacity and energy absorption for group 2/7 G2 composite layer thickness 2.5 mm; G7 0.5 mm aluminum

4 结　论

1. 开孔泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板在准静态局部受压时具有较好的整体性、稳定性和吸能性能, 典型荷载-位移曲线呈现四阶段: 弹性阶段、局部损伤阶段、整体损伤阶段和冲切破坏阶段。

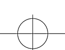
2. 平端面压头作用下复合夹芯板呈现局部冲切和弯曲失效模式, 渐变端面作用下呈现局部冲切失效模式, 简支边界条件下呈现整体弯曲失效模式。

3. 复合层厚度对复合夹芯板的力学性能影响显著, 其厚度在2.5~4 mm之间较宜; 球柱形压头作用下的破坏形态和力学性能与其他两种压头作用下有明显区别; 增强边缘约束可提高其局压力学性能。

4. 与传统蒙皮夹芯板相比, 泡沫铝/环氧树脂复合夹芯板在强度、刚度、吸能能力和整体性方面有显著提高。

参 考 文 献

1 J. Tbeals, M. S. Thompson, Density gradient effection aluminum



foam compressive behavior, Journal of Materials Science, **32**(13), 3593(1997)

2 WANG Bin, HE Deping, SHU Guangji, Compressive property and energy-absorption of foamed AI alloy, Acta Metallurgica Sinica, **36**(10), 1037(2000)
(王 斌, 何德坪, 舒光冀, 泡沫AI合金的压缩性能及其能量吸收, 金属学报, **36**(10), 1037(2000))

3 M. A. Yahaya, D. Ruan, Response of aluminum honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact- An experimental study, International Journal of Impact Engineering, **75**(1), 100 (2015)

4 J. Banhart, Manufacture characterization and application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science, **46**(6), 559 (2001)

5 YU Yinghua, LI Zhichao, LIU Jingfu, Research present situation and prospect for application on porous foam aluminum, Journal of Liaoning Technical University, **22**(2), 259(2003)
(于英华, 李智超, 刘敬福, 多孔泡沫铝性能研究现状及应用前景展望, 辽宁工程技术大学学报, **22**(2), 259(2003))

6 ZHAO Wanxiang, ZHAO Naiqin, GUO Xinquan, Study progress for new type functional materials of foam aluminum, Heat Treatment of Metals, **29**(6), 7(2004)
(赵万祥, 赵乃勤, 郭新权, 新型功能材料泡沫铝的研究进展, 金属热处理, **29**(6), 7(2004))

7 H. W. Seeliger, Aluminum foam sandwich (AFS) ready for market introduction, Advanced Engineering Materials, **6**(6), 448(2004)

8 S. Dirk, S. Hans-Wolfgang, Aluminum foam sandwich structure for space application, Acta Astronautca, **61**(1), 326(2007)

9 JING Lin, WANG Zhihua, ZHAO Longmao, Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich structures, Mechanics in Engineering, **37**(3), 1(2015)
(敬 霖, 王志华, 赵隆茂, 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展, 力学与实践, **37**(3), 1(2015))

10 S. R. Reid, T. Y Reddy, Experimental investigation of interia effects in one-dimensional metal ring systems, International Journal of Impact Energy, **1**(1), 277(1983)

11 Moon Sik HAN, Jae Ung CHO, Impact damage behavior of sandwich composite with aluminum foam core, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, **24**(S1), s42(2014)

12 Q. M. Li, H. Meng, Attenuation or enhancement-a one-dimensional analysis on shock transmission in the solid phase of a cellular material, International Journal of Impact Engineering, **27**(10), 1049 (2002)

13 JING Lin, WANG Zhihua, SONG Yanze, ZHAO Longmao, Dynamic response of a cellar metal sandwich panel subjected to metal foam projectile impact, Journal of Vibration and Shock, **30**(12), 22 (2011)
(敬 霖, 王志华, 宋延泽, 赵隆茂, 泡沫金属子弹撞击载荷下多孔金属夹芯板的动态响应, 振动与冲击, **30**(12), 22(2011))

14 PANG Baojun, ZHENG Wei, CHEN Yong, Dynamic impact behavior of aluminum foam with a taylor impact test and a theoretical analysis, Journal of Vibration and Shock, **32**(12), 154(2013)
(庞宝君, 郑 伟, 陈 勇, 基于Taylor实验及理论分析的泡沫铝动态特性研究, 振动与冲击, **32**(12), 154(2013))

15 WANG Qingchun, FAN Zijie, GUI Liangjin, WANG Zhenghong, FU Zilai, Energy absorption behavior of aluminum foam under medium strain rate, Chinese Journal of Materials Research, **19**(6), 601 (2005)
(王青春, 范子杰, 桂良进, 王政红, 付自来, 中等应变率下泡沫铝的吸能特性, 材料研究学报, **19**(6), 601(2005))

16 SHANG Jintang, HE Deping, Deformation of sandwich beams with Al foam cores in three-point bending, Chinese Journal of Materials Research, **17**(1), 31(2003)
(尚金堂, 何德坪, 泡沫铝层合梁的三点弯曲变形, 材料研究学报, **17**(1), 31(2003))

17 LIU Xinrang, TIAN Xiaogeng, LU Tianjian, LIANG Bin, WANG Yiqing, Blast-resistance behaviors of sandwich-walled hollow cylinders with aluminum foam cores, Journal of Vibration and Shock, **31**(23), 166(2012)
(刘新让, 田晓耕, 卢天健, 梁 斌, 王伊卿, 泡沫铝夹心圆筒抗爆性能研究, 振动与冲击, **31**(23), 166(2012))

18 G. Reyes Villanueva, W. J. Cantwell, Low velocity impact response of novel fiber-reinforced aluminum foam sandwich structures, Journal of Materials Science Letters, **22**(6), 417(2003)

19 K. Mohan, H. P. Seow, I. Sridhar, T. H, Yip, Effects of face sheet material in the indentation response of metallic foams, Journal of Material Science, **42**(11), 3714(2007)

20 O. B. Olurin, F. A. Fleck, M. F. Ashby, Indentation resistance of an lauminium foam, Scripta Materialia, **43**(11), 983(2000)

21 D. Ruan, G. X. Lu, Quasi-static indentation tests on aluminum foam sandwich panels, Composite Structures, **92**(9), 2039(2010)

22 LI Zhibin, LU Fangyun, Tests for indentation and perforation of sandwich panels with aluminium foam core, Journal of Vibration and Shock, **34**(4), 1(2015)
(李志斌, 卢芳云, 泡沫铝夹芯板压入和侵彻性能的实验研究, 振动与冲击, **34**(4), 1(2015))

23 ZHANG Min, CHEN Changjun, YAO Guangchun, Manufacturing technology of AI foam sandwich, Materials Review, **22**(1), 85 (2008)
(张 敏, 陈长军, 姚广春, 泡沫铝夹芯板的制备技术, 材料导报, **22**(1), 85(2008))

24 HE Chenchong, LU Wei, WANG Gang, YAN Biao, Preparation methods of aluminum foams and aluminum foam sandwichs, Metallic Functional Materials, **19**(5), 10(2012)
(何晨冲, 陆 伟, 王 岗, 严 彪, 泡沫铝及泡沫铝夹心板的制备方法, 金属功能材料, **19**(5), 10(2012))

25 XIN Yajun, LI Huijian, ZHAO Xuya, CHENG Shuliang, YU Wei, Compression and bending tests on integrated composite sandwich panel of epoxy resin/aluminum foam, Journal of Experimental Mechanics, **30**(4), 421(2015)
(辛亚军, 李慧剑, 赵旭亚, 程树良, 余 为, 环氧树脂/泡沫铝一体型复合夹层板压缩及弯曲试验研究, 实验力学, **30**(4), 421(2015))

